

System analizy krytyczności przewodów w sieciach wodociągowych z wykorzystaniem agregacji wielokryterialnej

Pipe criticality analysis system in water distribution systems using multi-criteria aggregation

ARIEL ANTONOWICZ, MATEUSZ LESZEK, ANDRZEJ URBANIAK, PRZEMYSŁAW ZAKRZEWSKI

DOI: 10.17512/INSTAL.2026.07.01

Celem pracy było opracowanie koncepcji systemu wspomagającego analizę krytyczności przewodów w sieciach wodociągowych oraz uporządkowanie pojęcia krytyczności w kontekście eksploatacji infrastruktury przez służby utrzymania ruchu. Dokonano przeglądu istniejących metod oceny, obejmujących m.in. wskaźniki topologiczne, hydrauliczne, jakościowe, bezpieczeństwa oraz ekonomiczne. Zaproponowano ich integrację, stosując podejście wielokryterialne. W części aplikacyjnej przedstawiono autorski system analizy krytyczności, wykorzystujący dane opisujące strukturę sieci oraz parametry eksploatacyjne. W analizie uwzględniono m.in. indeks Todiniego, liczbę zasuw odcinających niezbędnych do wyłączenia przewodu z eksploatacji, czas naprawy, współczynnik odporności oraz znaczenie odbiorców priorytetowych. Zaproponowano metodę agregacji poszczególnych wskaźników do postaci jednego syntetycznego wskaźnika, umożliwiającego klasyfikację przewodów pod względem ich znaczenia dla funkcjonowania systemu. Badania przeprowadzone na przykładowym modelu sieci wodociągowej wykazały, że zastosowane podejście pozwala na bardziej skuteczną identyfikację elementów infrastruktury o najwyższej krytyczności. Uzyskane wyniki mogą wspierać proces planowania działań eksploatacyjnych, usprawniać ocenę skutków awarii oraz ograniczać ryzyko długotrwałych przerw w dostawie wody. Wnioski wskazują, że integracja różnych kategorii wskaźników stanowi efektywne narzędzie wspomagające podejmowanie decyzji w przedsiębiorstwach wodociągowych, przyczyniając się do zwiększenia niezawodności sieci, optymalizacji kosztów oraz poprawy jakości usług.

Słowa kluczowe: analiza krytyczności, systemy wodociągowe, mierniki krytyczności, agregacja wielokryterialna, niezawodność systemów, odporność systemu, wspomaganie decyzji

The aim of the study was to develop the concept of a system supporting the analysis of pipe criticality in water distribution systems and to organise the notion of criticality in the context of infrastructure operation by maintenance services. The study reviews existing approaches to criticality assessment, including topological, hydraulic, water quality, security-related, and economic measures, and then proposes integrating them into a multi-criteria assessment model. In the implementation section, an original criticality analysis system is presented that uses data describing the structure of the water distribution network and its operational parameters. The analysis takes into account, among other factors, the Todini index, the number of isolation valves required to take a pipe out of service, repair time, a robustness coefficient, and the importance of priority consumers. A method for aggregating individual measures into a single synthetic indicator is proposed, enabling classification of pipes by their importance to the system's functioning. The analyses conducted on a test model of a water distribution network showed that using a multi-criteria approach enables more effective identification of the infrastructure elements with the highest criticality. The obtained results support improved planning of operational activities, prioritisation of maintenance and repair works, and decision-making in emergency situations.

Keywords: criticality analysis, water distribution systems, criticality measures, multi-criteria aggregation, system reliability, system robustness, decision support

Wprowadzenie

Systemy dystrybucji wody należą do infrastruktury krytycznej, dlatego ich eksploatacja wymaga nie tylko bieżącego usuwania awarii, lecz także wcześniejsze-

go wskazywania elementów, których uszkodzenie może wywołać największe skutki dla pracy całego układu. W praktyce przedsiębiorstwo wodociągowe musi odpowiedzieć na pozornie proste pytanie: które przewody powinny być traktowane

priorytetowo podczas przeglądów, remontów lub działań poawaryjnych. Odpowiedź nie jest oczywista, ponieważ znaczenie przewodu zależy jednocześnie od warunków hydraulicznych, struktury sieci, możliwości wyłączenia uszkodzone-

dr inż. Ariel Antonowicz ORCID: 0000-0002-6447-54491, Autor korespondencyjny: e-mail: ariel.antonowicz@cs.put.poznan.pl
mgr inż. Mateusz Leszek ORCID: 0009-0005-0876-37012, prof. dr hab. inż. Andrzej Urbaniak ORCID: 0000-0001-6765-55603,
dr inż. Przemysław Zakrzewski ORCID: 0000-0002-6488-03994, Instytut Informatyki i Telekomunikacji Politechnika Poznańska

go odcinka z eksploatacji, czasu naprawy i rodzaju odbiorców zasilanych przez dany fragment sieci.

W literaturze problem ten jest analizowany zarówno przez pryzmat odporności i niezawodności systemów dystrybucji wody, jak i przez narzędzia symulacyjne wspierające ocenę skutków awarii. Biblioteka WNTR (The Water Network Tool for Resilience) stanowi przykład środowiska przeznaczonego do oceny odporności sieci wodociągowych i prowadzenia analiz scenariuszowych [1, 2]. W ujęciu stosowanym przez United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA) miary wykorzystywane w analizie systemów dystrybucji wody porządkuje się m.in. w kategoriach topologicznych, hydraulicznych, jakości wody, bezpieczeństwa wody i ekonomicznych [1]. Takie uporządkowanie pokazuje, że krytyczność przewodu nie wynika wyłącznie z jednej właściwości technicznej, lecz z połączenia kilku typów konsekwencji awarii.

Badania nad globalną odpornością systemów wodociągowych wskazują, że skutki awarii tego samego elementu mogą być różne w zależności od struktury sieci, kierunków przepływu oraz aktualnych warunków hydraulicznych [3, 4]. Z kolei podejścia rankingowe są wykorzystywane m.in. do wspomagania harmonogramowania napraw po zdarzeniach katastroficznych [5], a symulacje hydrauliczne z użyciem WNTR mogą wspierać analizę krytyczności elementów sieci [6]. Osobnym, ale powiązaniem zagadnieniem jest podział sieci na podsegmenty, istotny przy ocenie możliwości wyłączenia uszkodzonych fragmentów z eksploatacji [7].

Celem artykułu jest przedstawienie procedury oceny krytyczności przewodów w sieciach wodociągowych, opartej na integracji miar hydraulicznych, topologicznych, eksploatacyjnych i usługowych. Zakres pracy obejmuje dobór miar częściowych, ich normalizację, agregację z wykorzystaniem średniej ważonej oraz interpretację wyniku końcowego w postaci rankingu i mapy krytyczności przewodów. Cechą wyróżniającą proponowane podejście jest spójna procedura łącząca wyniki symulacji hydraulicznych z informacjami istotnymi z punktu widzenia eksploatacji sieci wodociągowej. Uwzględniono m.in. liczbę zasuw odcinających wymaganych do wyłączenia przewodu z eksploatacji, przewidywany czas naprawy, stan armatury oraz obecność odbiorców priorytetowych. W odróżnieniu od podejść opartych na pojedynczych wskaźnikach proponowana metoda pozwala oceniać przewody z uwzględnieniem jednoczesnego oddziaływania kilku grup czynników.

Przedstawione podejście nie zastępuje szczegółowych analiz hydraulicznych ani

decyzji podejmowanych przez operatorów sieci. Jego zadaniem jest uporządkowanie wyników obliczeń i danych eksploatacyjnych w formie syntetycznego wskaźnika, który może wspierać priorytetyzację działań prowadzonych przez służby utrzymania ruchu (SUR) oraz terenowe służby utrzymania ruchu (TSUR).

Problem oceny krytyczności w eksploatacji sieci

Przewód krytyczny można zdefiniować jako odcinek sieci, którego awaria może doprowadzić do stanu częściowej lub ograniczonej zdatności sieci, ograniczyć dostawy wody do odbiorców priorytetowych albo spowodować znaczące skutki organizacyjne i kosztowe. W takim ujęciu krytyczność nie jest pojedynczą cechą, lecz oceną konsekwencji, jakie pojawią się po uszkodzeniu danego elementu. W procesie eksploatacji sieci wodociągowej szczególne znaczenie mają trzy grupy konsekwencji. Pierwsza obejmuje skutki hydrauliczne, np. spadek ciśnienia, zmianę kierunków przepływu, zmniejszenie rezerwy energetycznej układu opisywanej indeksem Todiniego lub pogorszenie warunków zasilania odbiorców. Druga dotyczy czynności operacyjnych: liczby zasuw odcinających potrzebnych do wyłączenia odcinka z eksploatacji, ryzyka niesprawności armatury oraz czasu przywrócenia zdolności dystrybucyjnych przewodu. Trzecia grupa odnosi się do skutków usługowych i społecznych, czyli wpływu awarii na odbiorców oraz obiekty, którym w procedurach przedsiębiorstwa lub w przepisach prawa można przypisać podwyższony priorytet zaopatrzenia w wodę. W dalszej części artykułu określa się je zbiorczo jako odbiorców priorytetowych.

Z tego powodu ranking oparty wyłącznie na jednej mierze może prowadzić do zbyt uproszczonych i nieprecyzyjnych decyzji, które w konsekwencji mogą powodować wydłużony czas przywracania zdolności dystrybucyjnych. Przewód o wysokim znaczeniu hydraulicznym może być łatwy do wyłączenia z eksploatacji, natomiast odcinek mniej istotny hydraulicznie może zasiląć obiekt priorytetowy albo wymagać czasochłonnej naprawy. Procedura wielokryterialna pozwala zestawić te sytuacje w jednej skali oceny. Ważne jest przy tym, aby wynik nie był traktowany jako automatyczna decyzja, lecz jako uporządkowana informacja wejściowa dla służb eksploatacyjnych. Ranking przewodów może wskazać odcinki wymagające uwagi, ale ostateczna decyzja powinna uwzględniać także dostępność brygad, warunki terenowe, planowane roboty drogowe, aktualne zapotrzebowanie na wodę

oraz możliwość prowadzenia prac bez istotnego pogorszenia jakości usług.

Z praktycznego punktu widzenia analiza krytyczności pełni więc funkcję pośrednią między modelem hydraulicznym a decyzją organizacyjną. Model obliczeniowy odpowiada zatem na pytania, jakie mogą być skutki uszkodzenia danego przewodu, natomiast procedury przedsiębiorstwa określają, jak szybko i jakimi zasobami należy zareagować. Tabela 1 porządkuje typy informacji, które powinny być uwzględniane w takiej ocenie.

Tabela 1. Kategorie informacji wykorzystywane w ocenie krytyczności przewodów, uporządkowane na podstawie klasyfikacji stosowanej w materiałach U.S. EPA [1]

Table 1. Categories of information used in pipe criticality assessment, organised according to the classification applied in U.S. EPA materials [1]

Kategoria oceny	Znaczenie w ocenie
Topologiczna	Uwzględnia położenie odcinka w strukturze grafowej sieci, w tym występowanie mostów oraz punktów artykulacji.
Hydrauliczna	Określa wpływ awarii na pracę układu, rezerwę energetyczną oraz odporność hydrauliczną systemu.
Eksploatacyjna	Obejmuje trudność wyłączenia odcinka z eksploatacji, stan techniczny armatury oraz przewidywany czas realizacji naprawy.
Usługowa	Uwzględnia obecność odbiorców priorytetowych oraz obiektów wymagających ciągłości zaopatrzenia w wodę.
Ekonomiczna	Odnosi się do potencjalnych kosztów przerwy w dostawie wody oraz kosztów działań naprawczych.

W analizie topologicznej sieć wodociągowa jest reprezentowana jako graf, w którym węzły odpowiadają punktom połączeń, a krawędzie przewodom wodociągowym. Mostem w grafie nazywa się krawędź, której usunięcie zwiększa liczbę składowych spójnych grafu. W praktyce oznacza to przewód, którego awaria lub wyłączenie z eksploatacji może spowodować rozdzielenie fragmentów sieci. Punktem artykulacji jest natomiast węzeł, którego usunięcie powoduje zwiększenie liczby spójnych składowych. Pojęcia te są wykorzystywane wyłącznie w sensie grafowym i służą do oceny znaczenia strukturalnego elementów sieci.

Metoda oceny i agregacji wielokryterialnej

W opisywanym podejściu ocena krytyczności przewodu została potraktowana jako procedura wieloetapowa. Najpierw dla każdego przewodu wyznaczane są miary cząstkowe opisujące różne konsekwencje potencjalnej awarii, następnie

wartości te są sprowadzane do wspólnej skali, a w ostatnim kroku agregowane do jednego wskaźnika syntetycznego. Oddzielenie etapu wyznaczania wskaźników krytyczności od etapu agregacji jest istotne, ponieważ pozwala w przyszłości zmieniać wagi lub dodawać nowe kryteria bez przebudowy całej procedury.

Do opisu każdego przewodu wybrano sześć miar, które zestawiono w Tabeli 2. Na potrzeby dalszych rozważań przyjęto także, że pojęcia „przewód”, „odcinek sieci” oraz „krawędź grafu” oznaczają ten sam element modelu sieci wodociągowej.

Tabela 2. Miary cząstkowe wykorzystane do budowy wskaźnika syntetycznego
Table 2. Partial measures used to construct the synthetic indicator

Miara	Znaczenie w procedurze
Indeks Todiniego	Określa wpływ awarii na rezerwę energetyczną sieci.
Liczba zasuw odcinających	Informuje o trudności wyłączenia uszkodzonego odcinka z eksploatacji.
Czas naprawy	Określa przewidywaną pracochłonność odtworzenia zdolności dystrybucyjnych przewodu.
Współczynnik odporności	Opisuje zdolność układu do pracy mimo wystąpienia awarii.
Czas od ostatniego przesterowania zasuw	Wskazuje ryzyko niesprawności armatury odcinającej.
Obiekty priorytetowe	Określają znaczenie odbiorców i obiektów wymagających ciągłości zaopatrzenia w wodę.

Miary hydrauliczne i odpornościowe

Indeks Todiniego reprezentuje hydrauliczny wymiar oceny i opisuje rezerwę energetyczną sieci po zaspokojeniu wymagań odbiorców [8]. W proponowanej procedurze jest traktowany jako miara globalna, którą należy sprowadzić do poziomu pojedynczego przewodu. W tym celu można kolejno symulować awarię przewodu, np. jego przerwanie albo wyciek spowodowany pęknięciem, i sprawdzać, jak zmienia się wartość rezerwy energetycznej całej sieci. Przy interpretacji takich scenariuszy istotne jest określenie przyjętego modelu zapotrzebowania, ponieważ podejście Demand Driven Analysis (DDA) zakłada realizację zadanego zapotrzebowania niezależnie od lokalnego ciśnienia, natomiast podejście Pressure Driven Analysis/Pressure Dependent Demand (PDA/PDD) uzależnia ilość dostarczonej wody od dostępnego ciśnienia.

W modelowaniu scenariuszy awaryjnych uszkodzenie przewodu może być reprezentowane m.in. jako wyciek wynikający z pęknięcia. Biblioteka WNTR umożli-

wia odwzorowanie takiego zdarzenia w modelu hydraulicznym i ocenę jego wpływu na warunki pracy sieci. Szybkość wycieku dla takiego scenariusza można zapisać w postaci:

$$d_{leak} = C_d A p^\alpha \sqrt{\frac{2}{\rho}} \quad (1)$$

gdzie d_{leak} jest szybkością wycieku [m^3/s], C_d oznacza współczynnik wypływu, A – powierzchnię pęknięcia [m^2], p – ciśnienie manometryczne w przewodzie [Pa], α – wykładnik ciśnienia, a ρ – gęstość cieczy [kg/m^3]. Porównanie wartości indeksu Todiniego przed i po zasymulowaniu awarii w przewodzie pozwala oszacować, jak silnie dane uszkodzenie wpływa na rezerwę energetyczną układu.

Drugą miarą hydrauliczną jest współczynnik odporności. W ujęciu zaproponowanym przez Junga i współautorów odporność można powiązać ze zmiennością ciśnienia węzłowego [9]. Współczynnik zmienności ciśnienia w węźle i definiuje się jako:

$$CV_i = \frac{\sigma_{P_i}}{P_{avg,i}} \quad (2)$$

gdzie CV_i oznacza bezwymiarowy współczynnik zmienności ciśnienia w węźle i $P_{avg,i}$ jest średnią wartością ciśnienia węzłowego [Pa], zależnie od przyjętej reprezentacji w modelu hydraulicznym, a σ_{P_i} oznacza odchylenie standardowe ciśnienia węzłowego w tej samej jednostce co $P_{avg,i}$. Odporność pojedynczego węzła można następnie zapisać jako:

$$Rob_i = 1 - CV_i \quad (3)$$

Ponieważ przedmiotem oceny są przewody, a współczynnik odporności wyznaczany jest dla węzłów, konieczne jest przypisanie tej wartości do odcinka sieci. Dla przewodu łączącego węzły i oraz j przyjęto podejście konserwatywne, w którym odporność przewodu jest równa mniejszej z odporności jego węzłów końcowych:

$$pipeRob_{ij} = \min(Rob_i, Rob_j), \quad i, j = 1, \dots, n_n \quad (4)$$

Oznacza to, że o ocenie przewodu decyduje słabszy z dwóch węzłów, pomiędzy którymi znajduje się analizowany odcinek. Jeżeli choć jeden z węzłów wykazuje niską odporność na zmiany ciśnienia, cały przewód traktowany jest jako bardziej podatny na skutki awarii lub niedoborów ciśnienia.

W dalszej agregacji należy uwzględnić, że odporność ma kierunek przeciwny do krytyczności. Wysoka wartość $pipeRob_{ij}$ oznacza korzystną sytuację eksploatacyjną, niska wartość wskazuje na większą podatność odcinka na skutki awarii lub niekorzystnych zmian warunków hydraulicznych. Dlatego przed agregacją miara odporności powinna zostać przekształcona tak, aby wyższa wartość znormalizowanej miary oznaczała większą krytyczność przewodu.

Miary eksploatacyjne

Czas naprawy przewodu oraz liczba zasuw odcinających wymaganych do wyłączenia przewodu z eksploatacji opisują operacyjny wymiar awarii. W literaturze zaproponowano proste zależności pozwalające oszacować czas wyłączenia, naprawy i wymiany przewodu [10]. Czas wyłączenia przewodu można zapisać jako:

$$T_i = 0,25 \cdot n_z \quad (5)$$

gdzie T_i oznacza czas wyłączenia uszkodzonego odcinka z eksploatacji [h], a n_z oznacza liczbę zasuw odcinających wymaganych do wyłączenia przewodu. Dla średnicy przewodu D czas naprawy i czas wymiany przewodu określono zależnościami:

$$T_n = 0,223 \cdot D^{0,577} \quad (6)$$

$$T_w = 0,156 \cdot D^{0,719} \quad (7)$$

gdzie T_n oznacza czas naprawy [h], T_w czas wymiany [h], a D średnicę przewodu [mm]. Zależności te mają charakter przybliżony, lecz pokazują, że większa średnica zwykle oznacza większy zakres robót, większą złożoność organizacyjną i dłuższy czas przywrócenia sieci do stanu sprawności.

Dodatkowym elementem eksploatacyjnym jest stan techniczny zasuw odcinających. Problem jest istotny, ponieważ w wielu miastach Polski znaczna część sieci wodociągowej składa się z przewodów eksploatowanych dłużej niż 50 lat, a duży udział mają również przewody w wieku 25-50 lat [11]. Z tego względu wiek zasuw i czas od jej ostatniego otwarcia lub zamknięcia mogą zwiększać ryzyko nieskutecznego wyłączenia przewodu z eksploatacji i dodatkowo zwiększyć obszar dotknięty skutkiem awarii. Współczynnik awaryjności zasuw odcinającej zapisano jako:

$$I_a = \frac{N_a}{W_z} \quad (8)$$

gdzie N_a oznacza liczbę awarii zasuwy, a W_z jej wiek wyrażony w latach. Stopień krytyczności zasuwy związany z czasem od ostatniego przesterowania przyjęto w postaci:

$$K_z = \frac{A_z \cdot 10 \cdot I_a}{W_z} \tag{9}$$

gdzie A_z oznacza czas od ostatniego otwarcia lub zamknięcia zasuwy, wyrażony w latach. Współczynnik o wartości 10 przyjęto jako parametr skalujący, którego zadaniem jest zwiększenie znaczenia dłuższego okresu bez przesterowania zasuwy w ocenie ryzyka eksploatacyjnego. Wartość ta ma charakter demonstracyjny i w praktycznym zastosowaniu powinna zostać skalibrowana na podstawie danych historycznych przedsiębiorstwa, obejmujących awarie armatury, wyniki testów zasuw oraz częstotliwość ich użytkowania. Tak zdefiniowana miara również wymaga normalizacji przed włączeniem do wskaźnika syntetycznego.

Normalizacja i agregacja

Ponieważ miary mają różne jednostki i skale, przed agregacją zastosowano normalizację min-max do przedziału [0, 1]:

$$\hat{x}_i = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \tag{10}$$

Przed agregacją ujednolicono kierunek interpretacji wszystkich miar. Przyjęto, że po normalizacji większa wartość każdej składowej powinna oznaczać większą krytyczność przewodu. Dla liczby zasuw odcinających, czasu naprawy oraz czasu od ostatniego przesterowania armatury zależność ta jest bezpośrednia, ponieważ większe wartości oznaczają większą trudność działań terenowych. W przypadku miar odpornościowych zależność jest odwrotna: wysoka odporność oznacza sytuację korzystną i zmniejsza krytyczność przewodu. Dlatego przed agregacją miary te należy odwrócić, aby spadek odporności odpowiadał wzrostowi krytyczności.

Syntetyczny wskaźnik krytyczności przewodu (p) obliczono jako średnią ważoną:

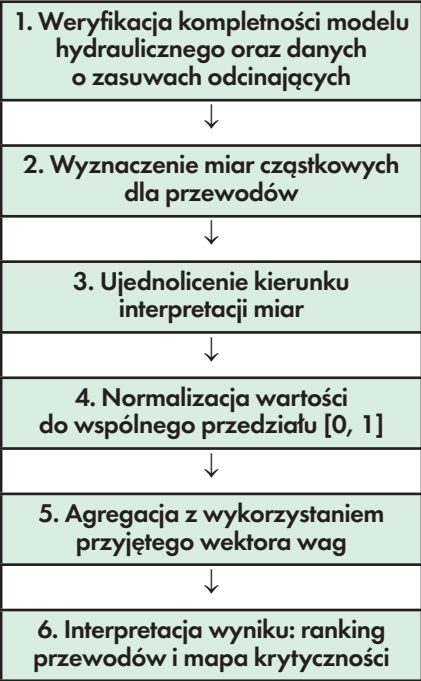
$$C_p = \frac{\sum_{k=1}^m w_k \hat{x}_{p,k}}{\sum k = 1^m w_k} \tag{11}$$

gdzie $\hat{x}_{p,k}$ oznacza znormalizowaną wartość k -tej miary dla przewodu p , a w_k jest wagą tej miary. Średnia ważona została

wybrana jako metoda interpretowalna i łatwa do kalibracji przez operatorów przedsiębiorstwa wodociągowego. Jej ograniczeniem jest subiektywność wag, dlatego wartości wag powinny być w praktyce uzgadniane na podstawie procedur eksploatacyjnych, danych historycznych i konsultacji branżowych.

Przebieg obliczeń przedstawiony na schemacie z tabeli 3 pozwala zachować spójność między częścią modelową i eksploatacyjną. Szczególnie ważny jest etap weryfikacji danych wejściowych. Niepełne dane o zasuwach odcinających, odbiorcach priorytetowych albo średnicach przewodów mogą istotnie wpłynąć na ranking, ponieważ część wskaźników jest wyznaczana bezpośrednio z topologii sieci, modelu hydraulicznego oraz ewidencji uzbrojenia.

Tabela 3. Schemat procedury obliczania wskaźnika syntetycznego.
Table 3. Procedure for calculating the synthetic indicator.



Model testowy i dane wejściowe

Procedurę przetestowano na rozbudowanym modelu sieci wodociągowej. Model miał charakter testowy, ale jego skala pozwalała analizować zarówno lokalne skutki wyłączenia pojedynczego odcinka z eksploatacji, jak i szersze konsekwencje topologiczne oraz hydrauliczne. Model sieci wodociągowej wykorzystanej do badań został przedstawiony na rysunku 1, a zakres danych wejściowych ujęto w tabeli 4.

Zestawienie to pokazuje skalę analizowanego układu oraz zakres informacji potrzebnych do obliczenia miar cząstkowych,

ich normalizacji i późniejszej agregacji do postaci syntetycznego wskaźnika krytyczności.

Tabela 4. Zakres danych modelu testowego przyjętego do analizy
Table 4. Scope of test model data adopted for the analysis

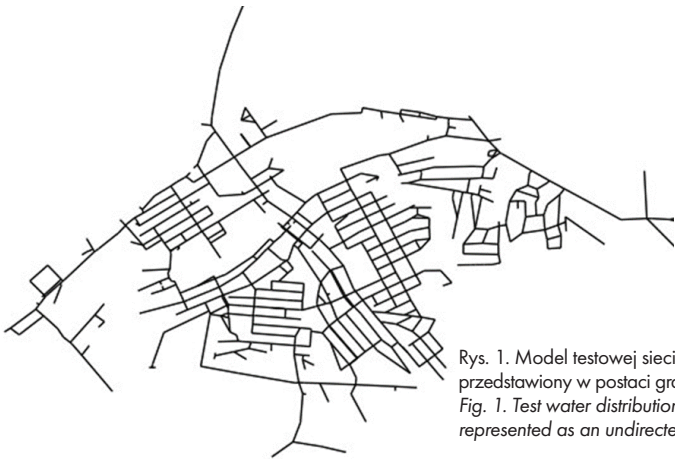
Element modelu	Liczba
Przewody wodociągowe	922
Węzły obliczeniowe	659
Zasuw odcinające	263

Model testowy potraktowano jako reprezentację sieci obejmującej zarówno odcinki o znaczeniu lokalnym, jak i przewody istotne dla większych fragmentów układu. Przyjęta skala modelu umożliwiała sprawdzenie działania procedury w warunkach bardziej złożonych niż prosta sieć demonstracyjna. Uwzględnienie zasuw odcinających pozwala dodatkowo analizować przypadki, w których wyłączenie przewodu z eksploatacji wymaga wskazania kilku elementów armatury i nie może być sprowadzone do pojedynczej operacji.

Na etapie przygotowania danych założono, że każdy przewód może zostać opisany zestawem cech technicznych i eksploatacyjnych. W tabeli 5 przedstawiono podstawowe źródła danych wykorzystywane w procedurze oraz odpowiadający im zakres informacji. Część danych pochodzi bezpośrednio z modelu hydraulicznego, część z reprezentacji grafowej sieci, natomiast dane eksploatacyjne mogą być pozyskiwane z systemu CMMS (Computerized Maintenance Management System), czyli komputerowego systemu zarządzania utrzymaniem ruchu. Taki sposób organizacji danych jest zgodny z praktyką przedsiębiorstw wodociągowych, gdzie informacja o sieci jest zwykle rozproszona między modelem hydraulicznym, ewidencją GIS (Geographic Information System), dokumentacją techniczną oraz historią prac eksploatacyjnych.

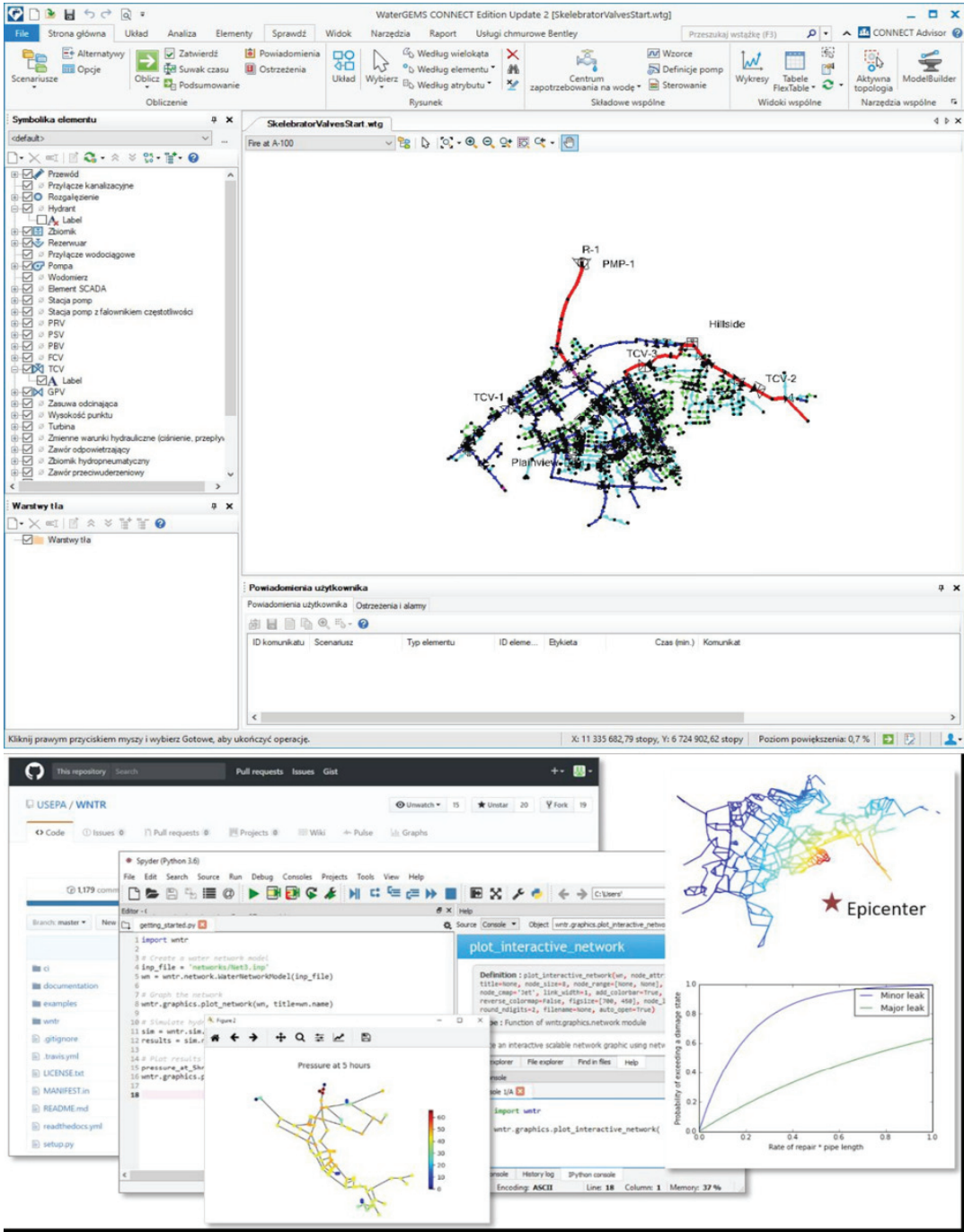
W obliczeniach wykorzystano dwa środowiska. WaterGEMS służył do przygotowania i kontroli modelu inżynierskiego, natomiast WNTR umożliwił prowadzenie analiz programistycznych, symulacji scenariuszowych i obliczeń grafowych (rysunek 2). Takie połączenie środowisk ułatwia pracę z modelem sieci, zapewnia elastyczność obliczeniową i możliwość automatyzacji analiz [1, 2].

Biblioteka WNTR znajduje zastosowanie w analizach odporności i krytyczności systemów dystrybucji wody, obejmujących m.in. symulacje hydrauliczne oraz ocenę skutków uszkodzeń elementów sieci. Jej wykorzystanie w analizie krytyczności elementów sieci wodociągowej przedstawili Antonowicz i Urbaniak [6].



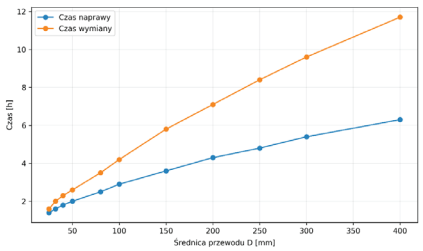
Rys. 1. Model testowej sieci wodociągowej przedstawiony w postaci grafu nieskierowanego
Fig. 1. Test water distribution network model represented as an undirected graph

Źródło danych	Zakres informacji
Model hydrauliczny	Przewody, węzły, średnice oraz warunki pracy sieci.
Reprezentacja grafowa	Połączenia między elementami, mosty oraz ścieżki przepływu.
Ewidencja armatury	Lokalizacja zasuw odcinających oraz możliwość wyłączenia odcinków z eksploatacji.
Dane eksploatacyjne	Czas napraw, historia przesterowań oraz stan techniczny.
Warstwa usługowa	Odbiorcy priorytetowi oraz obiekty wymagające ciągłości zaopatrzenia w wodę.



Rys. 2. Środowiska wykorzystane w przepływie analitycznym: modelowanie inżynierskie i obliczenia programistyczne
Fig. 2. Environments used in the analytical workflow: engineering modelling and computational analysis

Ponadto, przyjętą w procedurze zależność między średnicą przewodu a szacowanym czasem naprawy i wymiany przedstawiono na rysunku 3 [10].



Rys. 3. Zależność między średnicą przewodu (D) a szacowanym czasem naprawy i wymiany [10]
Fig. 3. Relationship between pipe diameter (D) and estimated repair and replacement time [10]

Wykres pełni funkcję pomocniczą i pokazuje wpływ średnicy przewodu D [mm] na szacowany czas naprawy i wymiany [h] przyjęty w procedurze. Zależności te nie stanowią samodzielnej podstawy klasyfikacji przewodów, lecz uzasadniają włączenie czasu przywrócenia zdolności dystrybucyjnych jako jednej z miar częściowych w analizie wielokryterialnej. Wartość tej miary powinna być w praktycznym zastosowaniu kalibrowana na podstawie danych eksploatacyjnych przedsiębiorstwa, obejmujących historię awarii, roboczogodziny oraz rzeczywiste czasy napraw.

Wyniki analizy i interpretacja

Dla wybranego modelu testowego wyznaczono wartości miar częściowych, następnie przeskalowano je do wspólnego przedziału i zagregowano za pomocą przyjętego wektora wag. Wariant wag zastosowany w analizie ma charakter demonstracyjny: jego celem jest pokazanie działania procedury, a nie narzucenie uniwersalnej polityki oceny dla wszystkich przedsiębiorstw. Wartości wag przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Wektor wag zastosowany w demonstracji metody agregacji wielokryterialnej.
Table 6. Weight vector used in the demonstration of the multi-criteria aggregation method.

Miara częściowa	Waga
Indeks Todiniego	0,5
Liczba zasuw niezbędnych do wyłączenia przewodu z eksploatacji	0,4
Czas naprawy przewodu	0,1
Współczynnik odporności	0,3
Czas od ostatniego otwarcia lub zamknięcia zasuw odcinającej	0,2
Obiekty priorytetowe	0,5

Ponieważ dobór wag ma charakter ekspercki, należy je traktować jako wariant demonstracyjny, służący do pokazania

działania procedury agregacji. W praktycznym zastosowaniu metody wskazane jest przeprowadzenie analizy wrażliwości rankingu na zmianę wag poszczególnych kryteriów. Analiza taka może polegać na porównaniu kilku wariantów oceny, w których zwiększa się znaczenie wybranych grup miar: hydraulicznych, eksploatacyjnych lub usługowych.

W wariantie hydraulicznym większe znaczenie przypisuje się indeksowi Todiniego oraz współczynnikowi odporności, co pozwala ocenić wpływ pracy hydraulicznej sieci na ranking przewodów. W wariantie eksploatacyjnym zwiększa się wagi liczb zasuw odcinających, czasu naprawy oraz stanu armatury, aby sprawdzić wpływ trudności działań terenowych. Wariant usługowy wzmacnia natomiast znaczenie odbiorców priorytetowych i pozwala ocenić, w jakim stopniu ciągłość zaopatrzenia tych odbiorców wpływa na klasyfikację przewodów. Porównanie czołowych pozycji rankingu w poszczególnych wariantach umożliwia ocenę stabilności klasyfikacji oraz wskazanie przewodów, których wysoka pozycja wynika z jednego dominującego kryterium.

Wynikiem agregacji jest uporządkowana lista przewodów. Jej fragment przedstawiono w tabeli 7. Na potrzeby interpretacji wyników przyjęto czterostopniową klasyfikację przewodów według wartości syntetycznego wskaźnika krytyczności C_p .

- $0,75 \leq C_p \leq 1,00$ – bardzo wysoka krytyczność,
- $0,50 \leq C_p < 0,75$ – wysoka krytyczność,
- $0,25 \leq C_p < 0,50$ – podwyższona krytyczność,
- $0,00 \leq C_p < 0,50$ – niska krytyczność.

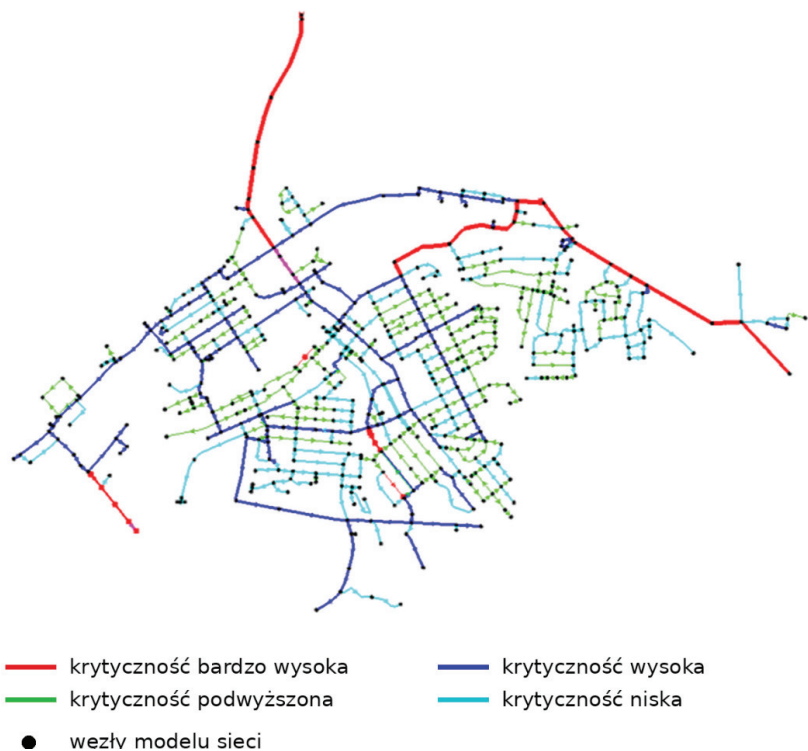
Przyjęte progi mają charakter demonstracyjny i w zastosowaniach praktycznych powinny zostać dostosowane do lokalnych procedur eksploatacyjnych oraz poziomu akceptowalnego ryzyka w danym przedsiębiorstwie wodociągowym.

Tabela 7. Przykładowy wycinek rankingu przewodów po agregacji wielokryterialnej dla modelu testowego – wartości znormalizowane

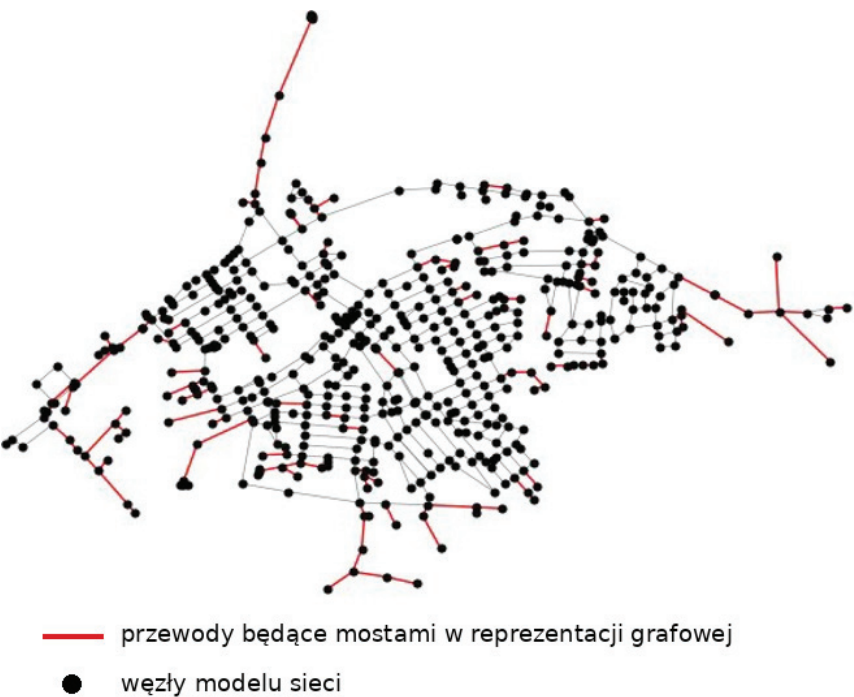
Table 7. Example excerpt from the pipe ranking after multi-criteria aggregation for the test model – normalised values

Poz.	ID	T	Z	N	R	S	Cp	Klasa
1	P-214	0,91	0,88	0,74	0,86	1,00	0,88	bardzo wysoka
2	P-387	0,84	0,92	0,69	0,81	1,00	0,84	bardzo wysoka
3	P-126	0,89	0,76	0,71	0,83	0,80	0,80	wysoka
4	P-508	0,73	0,94	0,77	0,70	0,80	0,78	wysoka
5	P-066	0,80	0,68	0,64	0,76	0,80	0,74	wysoka
6	P-731	0,66	0,86	0,70	0,69	0,60	0,69	podwyższona
7	P-455	0,71	0,62	0,58	0,74	0,60	0,66	podwyższona
8	P-019	0,63	0,72	0,61	0,65	0,60	0,63	podwyższona

T – znormalizowana wartość indeksu Todiniego, Z – liczba zasuw odcinających niezbędnych do wyłączenia przewodu z eksploatacji, N – czas naprawy, R – znormalizowana wartość współczynnika odporności systemu, S – znaczenie odbiorców priorytetowych, C_p – syntetyczny wskaźnik krytyczności.



Rys. 4. Prezentacja syntetycznego wskaźnika krytyczności przewodów po agregacji wielokryterialnej
Fig. 4. Presentation of the synthetic pipe criticality index after multi-criteria aggregation



Rysunek 5. Przewody będące mostami w reprezentacji grafowej modelu testowego
Figure 5. Pipes identified as bridges in the graph representation of the test model

znaczenie eksploatacyjne nawet wtedy, gdy nie należy do największych przewodów pod względem hydraulicznym. Zestawienie tego wyniku z rankingiem syntetycznym pozwala odróżnić odcinki ważne topologicznie od odcinków ważnych ze względu na łączny efekt wielu kry-

teriów. Jest to ważne, ponieważ sama obecność mostu w grafie nie przesądza jeszcze o najwyższej klasie krytyczności. Dopiero połączenie tej informacji z danymi hydraulicznymi, operacyjnymi i usługowymi pozwala ocenić rzeczywiste znaczenie przewodu dla procesu eksploatacji.

Interpretację klas wskaźnika zestawiono w tabeli 8. Nie należy jej traktować jako sztywnej instrukcji eksploatacyjnej, lecz jako przykład przełożenia wartości modelowych na decyzje. Wdrożenie w przedsiębiorstwie wymagałoby dopasowania progów klas do lokalnych procedur, standardów obsługi odbiorców i historii awarii.

Tabela 8. Interpretacja klas wskaźnika krytyczności dla potrzeb eksploatacji
Table 8. Interpretation of criticality index classes for operational purposes

Klasa wyniku	Charakter przewodów	Przykładowa decyzja
Bardzo wysoka	Przewody o wysokim wpływie hydraulicznym, trudne do wyłączenia z eksploatacji, zasilające odbiorców priorytetowych	Pilna analiza eksploatacyjna, przegląd zasuw odcinających, przygotowanie procedury awaryjnej
Wysoka	Przewody istotne hydraulicznie lub topologicznie, o podwyższonej trudności obsługi	Przeglądy priorytetowe, testy zasuw odcinających
Podwyższona	Przewody o lokalnym wpływie hydraulicznym lub wydłużonym czasie naprawy	Kontrola okresowa, monitoring, uwzględnienie w planach remontowych
Niska	Odcinki redundantne, łatwe do wyłączenia z eksploatacji	Standardowy harmonogram prac

Z punktu widzenia jednostek SUR i TSUR najważniejsza jest nie sama wartość zagregowanego wskaźnika krytyczności (Cp), lecz możliwość jego wykorzystania w procesie wspomagania decyzji podczas planowania napraw lub modernizacji sieci wodociągowej. Połączenie rankingu z schematem sieci daje dwa poziomy informacji: listę odcinków priorytetowych oraz ich kontekst przestrzenny. Wynik może wspierać planowanie przeglądów, priorytetyzację remontów, ocenę skutków awarii i porównywanie wariantów scenariuszowych.

Dyskusja i ograniczenia

Przedstawione wyniki pokazują, że zaproponowana procedura może porządkować informacje, które w praktyce eksploatacyjnej często funkcjonują oddzielnie: wyniki obliczeń hydraulicznych, dane o armaturze, czasochłonność napraw oraz priorytetowość odbiorców. Dzięki temu ranking nie jest wyłącznie wynikiem symulacji, lecz próbą przełożenia danych technicznych na informację użyteczną w planowaniu działań eksploatacyjnych. Główną wartością podejęcia wielokryterialnego jest więc połączenie perspektywy hydraulicznej, eksploatacyjnej i organizacyjnej. Jest to zgodne z kierunkiem badań, w których podkreśla się potrzebę łączenia miar technicznych z oceną zdolności reagowania na awarie oraz niekorzystne zmiany warunków pracy sieci [3, 5, 12].

Procedura ma jednak ograniczenia. Wynik zależy od przyjętych wag, a więc od polityki eksploatacyjnej i eksperckiej oceny znaczenia poszczególnych kryteriów. Model testowy nie zastępuje kalibracji na danych rzeczywistych, a część parametrów, np. czas naprawy lub ryzyko niesprawności elementów uzbrojenia sieci, w praktyce wymaga zasilenia danymi historycznymi z przedsiębiorstwa wodociągowego. Ograniczeniem jest również przyjęcie jednej postaci funkcji agregującej. Średnia ważona jest metodą przejrzystą, ale może częściowo kompensować bardzo zły wynik jednej miary dobrym wynikiem innej. W zastosowaniach krytycznych warto zatem rozważyć dodatkowe reguły progowe, np. automatyczne podniesienie klasy przewodu, jeżeli zasila odbiorcę priorytetowego i jednocześnie wymaga czasochłonnego wyłączenia z eksploatacji.

Na interpretację wyników wpływa także model zapotrzebowania przyjęty w symulacjach hydraulicznych. W analizach awaryjnych podejście PDA/PDD jest zwykle bardziej adekwatne niż klasyczne DDA, ponieważ pozwala powiązać ilość dostarczanej wody z dostępnym ciśnieniem. Z tego względu przy praktycznym wdrożeniu procedury należy jawnie określić przyjęty model zapotrzebowania oraz sprawdzić wpływ tego wyboru na wartości miar hydraulicznych i końcowy ranking przewodów.

Należy również uwzględnić możliwość częściowej współzależności niektórych miar. Średnica przewodu wpływa bezpośrednio na szacowany czas naprawy i wymiany, a pośrednio może oddziaływać także na wyniki hydrauliczne, w tym na zmianę wartości indeksu Todiniego. Oznacza to ryzyko nadmiernego wzmocnienia znaczenia przewodów o dużych średnicach w końcowym rankingu. Z tego względu wskazane jest wykonanie analizy wrażliwości obejmującej warianty z obniżonymi wagami miar zależnych od średnicy oraz porównanie ich z czynnikami niezależnymi od średnicy, takimi jak liczba zasuw odcinających, obecność odbiorców priorytetowych czy stan armatury.

Osobnym problemem jest aktualność danych. Ranking obliczony na podstawie nieaktualnej lokalizacji zasuw lub niezwerifikowanego stanu armatury może prowadzić do błędnej interpretacji. Procedura powinna być zatem powiązana z bieżącą aktualizacją danych eksploatacyjnych, zwłaszcza informacji o przesterowaniach zasuw, naprawach, zmianach w układzie zasilania oraz pojawieniu się nowych odbiorców priorytetowych.

W praktycznym wdrożeniu zasadne jest rozdzielenie dwóch poziomów walidacji. Pierwszy dotyczy poprawności oblicze-

niowej, czyli sprawdzenia, czy wartości miar cząstkowych są wyznaczane zgodnie z definicjami, a normalizacja nie powoduje utraty informacji. Drugi dotyczy użyteczności decyzyjnej, a więc porównania rankingu z ocenami operatorów, historią awarii oraz rzeczywistymi kosztami usuwania uszkodzeń. Dopiero zgodność obu poziomów pozwala traktować wskaźnik jako stabilne narzędzie wspomagania decyzji.

Tabela 9. Ograniczenia procedury i możliwe sposoby ich ograniczenia.
Table 9. Limitations of the procedure and possible mitigation measures.

Ograniczenie	Możliwy sposób ograniczenia
Subiektywność wag	Konsultacje eksperckie, analiza wrażliwości oraz porównanie kilku wariantów wag.
Współzależność miar zależnych od średnicy	Analiza wrażliwości wag, wariant bez miar zależnych od średnicy oraz porównanie z czynnikami niezależnymi, np. Zasuwanami i odbiorcami priorytetowymi.
Niepełne dane o armaturze	Cykliczne testy zasuw oraz aktualizacja ewidencji terenowej.
Szacunkowy czas naprawy	Kalibracja na podstawie historii awarii i roboczo-godzin.
Zmienność warunków pracy sieci	Obliczenia scenariuszowe dla różnych stanów hydraulicznych.
Brak walidacji wdrożeniowej	Porównanie rankingu z decyzjami służb eksploatacyjnych.

Tabela 9 pokazuje, że najważniejsze ograniczenia nie przekreślają przydatności metody, lecz wskazują kierunek jej dalszego dopracowania. Procedura może być wdrażana etapowo: najpierw jako narzędzie analityczne do porównywania przewodów, następnie jako element planowania prewencyjnego, a po kalibracji jako komponent systemu wspomagania decyzji w działaniach awaryjnych.

Dalszy rozwój metody powinien obejmować walidację na rzeczywistych modelach sieci, analizę stabilności rankingu przy zmianie wag oraz porównanie wyników z decyzjami podejmowanymi przez służby eksploatacyjne. Warto również rozważyć bardziej zaawansowane metody agregacji, np. AHP, logikę rozmytą lub modele uczące się na historii awarii. Średnia ważona jest dobrym punktem wyjścia, ponieważ jest przejrzysta, ale przy dużej liczbie kryteriów może nie odzwierciedlać wszystkich zależności między czynnikami.

Wnioski

Przedstawiono procedurę analizy krytyczności przewodów w sieciach wodociągowych, opartą na agregacji wielokryterialnej. Jej główną zaletą jest możliwość połączenia miar hydraulicznych, topologicznych, eksploatacyjnych i usługowych w jeden syntetyczny wskaźnik przypisany

do każdego przewodu. Taki wskaźnik pozwala budować ranking odcinków istotnych dla ciągłości dostaw wody i interpretować go w kontekście przestrzennym.

Analiza modelu testowego pokazała, że najwyższe priorytety uzyskują odcinki, dla których jednocześnie występuje kilka rodzajów konsekwencji: pogorszenie warunków hydraulicznych, trudność wyłączenia z eksploatacji, dłuższy czas naprawy lub obecność odbiorców priorytetowych. Oznacza to, że agregacja wielokryterialna daje bardziej zrównoważony obraz znaczenia przewodów niż ocena oparta na pojedynczym parametrze.

Powyższą dyskusję można podsumować następująco:

- krytyczność przewodu ma charakter wielowymiarowy i powinna być oceniana przez zestaw wskaźników, a nie przez jedną zmienną;
- średnia ważona po normalizacji umożliwia budowę czytelnego rankingu, zrozumiałego dla użytkownika technicznego;
- uwzględnienie liczby zasuw odcinających, czasu naprawy i stanu armatury zwiększa użyteczność wyniku dla służb eksploatacyjnych;
- mapa krytyczności ułatwia wskazanie obszarów wymagających przeglądów, testów zasuw odcinających lub przygotowania procedur awaryjnych;
- pełne wdrożenie wymaga kalibracji wag i walidacji na danych rzeczywistych.

W porównaniu z podejściem opartym wyłącznie na jednej kategorii miar zaproponowana procedura lepiej odpowiada rzeczywistym uwarunkowaniom eksploatacji. Pozwala uwzględnić zarówno zachowanie hydrauliczne sieci, jak i ograniczenia organizacyjne związane z działaniem brygad terenowych. Z tego powodu wynik analizy może być interpretowany nie tylko jako rezultat obliczeń, ale również jako narzędzie komunikacji między osobami odpowiedzialnymi za modelowanie, utrzymanie infrastruktury i planowanie działań awaryjnych.

Zaproponowane podejście wpisuje się w problematykę eksploatacji systemów w inżynierii środowiska, ponieważ łączy modelowanie komputerowe z potrzebami zarządzania infrastrukturą techniczną. Może stanowić podstawę rozwoju narzędzi wspomagania decyzji w przedsiębiorstwach wodociągowych, szczególnie w obszarze planowania prewencyjnego, priorytetyzacji remontów i reagowania na awarie.

Literatura

[1] S. M. Klise, R. M. Hart, M. Bynum et al., Water Network Tool for Resilience (WNTR) User Manual, U.S. Environmental Protection Agency and Sandia National Laboratories, 2017.

- [2] S. M. Klise, M. Bynum, D. Moriarty and R. Murray, "A software framework for assessing the resilience of drinking water systems," *Environmental Modelling & Software*, vol. 95, pp. 420–431, 2017, doi: 10.1016/j.envsoft.2017.06.013.
- [3] M. Diao, M. Rauch and K. Sitzenfrei, "Global resilience analysis of water distribution systems," *Water Research*, vol. 106, pp. 383–393, 2016, doi: 10.1016/j.watres.2016.09.011.
- [4] F. Meng, G. Fu, R. Farmani, C. Sweetapple and D. Butler, "Topological attributes of network resilience: A study in water distribution systems," *Water Research*, vol. 143, pp. 376–386, 2018, doi: 10.1016/j.watres.2018.06.048.
- [5] A. Bałut, R. Brodziak, J. Byłka and P. Zakrzewski, "Ranking approach to scheduling repairs of a water distribution system for the post-disaster response and restoration service," *Water*, vol. 11, no. 8, 1591, 2019, doi: 10.3390/w11081591.
- [6] A. Antonowicz and A. Urbaniak, "Analiza krytyczności elementów sieci wodociągowej na podstawie symulacji hydraulicznych z wykorzystaniem biblioteki WNTR," *Instal*, no. 6, pp. 43–48, 2022, doi: 10.36119/15.2022.6.6.
- [7] A. Antonowicz, "Network subsegmentation method on the example of water distribution systems," in *Proceedings of the 39th ECMS International Conference on Modelling and Simulation*, M. Scarpa, Ed., European Council for Modelling and Simulation, Catania, Italy, 2025, pp. 405–411.
- [8] E. Todini, "Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach," *Urban Water*, vol. 2, no. 2, pp. 115–122, 2000, doi: 10.1016/S1462-0758(00)00049-2.
- [9] D. Jung, D. Kang, J. H. Kim and K. Lansey, "Robustness-based design of water distribution systems," *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 140, no. 11, 04014033, 2014, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000421.
- [10] D. Paez, Y. Filion and M. Hulley, "Battle of postdisaster response and restoration (BPDRR) – problem description and rules," in *Proceedings of the 1st International WDSA/CCWI Joint Conference*, Kingston, Canada, 2018.
- [11] Najwyższa Izba Kontroli, Utrzymanie i eksploatacja sieci wodociągowych w miastach, Informacja o wynikach kontroli P/17/048, Warszawa, 2018.
- [12] S. Weber, M. Hart and S. Klise, "Vulnerability assessment of water distribution systems," *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 146, no. 2, 2020.

STUDIA PODYPLOMOWE Politechnika Śląska w Gliwicach

Rozpoczęła się rekrutacja na kolejne edycje studiów podyplomowych.
Czekamy na Ciebie!



**Zarządzanie gospodarką wodną
i ochrona wód
– Wody: Interdyscyplinarne
Podjęcie (WIP)**



**Systemy Bezpieczeństwa
Zapotrzebowania w Wodę**



październik 2026 - czerwiec 2027
(2 semestry)

Politechnika Śląska, jako uczelnia kładąca szczególny nacisk na przygotowywanie kadr zgodnie z aktualnym zapotrzebowaniem regionu i kraju oraz ze względu na coraz większe zainteresowanie wpływem różnorodnych czynników na racjonalną gospodarkę zasobami wodnym przy współpracy z Regionalnym Zarządem Gospodarki Wodnej w Gliwicach uruchamia rekrutację na kolejną edycję dwusemestralnych studiów podyplomowych Zarządzanie gospodarką wodną i ochrona wód – Wody: Interdyscyplinarne Podjęcie.

Absolwent tych studiów rozszerzy, jak i zdobędzie wiedzę z zakresu prawnych aspektów gospodarki wodnej, w tym najważniejszych zmian zapisów Ustawy z dnia 20 lipca 2017 r. – Prawo wodne, wprowadzonych Ustawą z 13 marca 2026 r. (Dz.U. 2026, poz. 605) dotyczących oceny ryzyka i zarządzania ryzykiem w obszarach zasilania dla punktów poboru wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi.

Gwarantujemy wysoką jakość i najnowsze metody kształcenia oraz praktyczne seminaria wyjazdowe.

Dwusemestralne studia podyplomowe, poświęcone są zarządzaniu ryzykiem w zaopatrzeniu w wodę. Zostały uruchomione z myślą o przygotowaniu kadr do przeprowadzania ocen ryzyka i wdrażania Planów Bezpieczeństwa Wody, w oparciu o obowiązujące od 2026 roku regulacjami prawnymi (Dz. U. 2026, poz. 605 oraz Dz.U. 2026, poz. 748).

Dają możliwość zdobycia interdyscyplinarnej wiedzy dotyczącej identyfikacji zagrożeń i zdarzeń niebezpiecznych, oceny ryzyka z nimi związanego dla jakości wody i zdrowia ludzkiego oraz zarządzania tym ryzykiem.

Zakres merytoryczny studiów uwzględni aspekty prawne, organizacyjne, techniczno-technologiczne, zdrowotne oraz praktyczne postępowanie. Program studiów zgodnie z zaleceniami nowych regulacji obejmuje wszystkie elementy Planów Bezpieczeństwa Wody według zaleceń i wytycznych WHO oraz normy europejskiej PN-EN 15975-2:2013-12 Bezpieczeństwo zaopatrzenia w wodę do spożycia — Wytyczne dotyczące zarządzania kryzysowego i ryzyka — Część 2: Zarządzanie ryzykiem a także studia przypadków (praktyczne przykłady Planów bezpieczeństwa wody). Wiedza ta ułatwi interpretację nowych, obowiązujących już przepisów prawnych. Integralnym elementem programów studiów są wizyty studyjne na wybranych obiektach wodociągowych.

**Zajęcia odbywają się w trybie hybrydowym, łączącym zajęcia w trybie online
ze stacjonarnymi sobotnio-niedzielnymi zjazdami**

Szczegółowe informacje na temat studiów podyplomowych



<https://rekrutacja.polsl.pl/kierunek/wip/>



REKRUTACJA ONLINE



<https://rekrutacja.polsl.pl/kierunek/spd-sbzw/>

